

**Análise de métricas de desempenho de geradores em uma usina termoeétrica****Performance metrics analysis in generators of a thermoelectric powerplant**

Recebimento dos originais: 11/01/2019

Aceitação para publicação: 05/02/2019

**Gabriel Quirino Fechine**

Mestrando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande

Instituição: Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-900

E-mail: gabriel.fechine@ee.ufcg.edu.br;

**Célio Anésio da Silva**

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande

Instituição: Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-900

E-mail: celio@dee.ufcg.edu.br;

**Joseana Macêdo Fechine Régis de Araújo**

Doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande

Instituição: Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-900

E-mail: joseana@computacao.ufcg.edu.br;

**Natália Porfírio Albuquerque**

Graduada em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande

Instituição: Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-900

E-mail: nataliapalbuquerque@gmail.com;

**RESUMO**

Com as mudanças na matriz energética brasileira que vêm ocorrendo nos últimos anos devido às crises hídricas, estudos realizados em usinas termoeletricas se tornam cada vez mais pertinentes. Na pesquisa aqui descrita, a partir de uma análise documental dos registros de operação e de relatórios ambientais de uma usina termoeletrica, foram realizados estudos probabilísticos de métricas de desempenho da usina em questão. Essas análises foram divididas em: análises de correlação e análises de consumo específico e rendimento, a partir das quais são estudadas diferentes métricas, com diferentes abordagens. A primeira análise fornece indícios de que a correlação entre as métricas de desempenho estudadas (operacionais e ambientais) não seguem um padrão global, mas sim, dependem do motor sob análise. O resultado da análise seguinte foi de que grandezas como o consumo específico e o rendimento do grupo gerador se mantiveram praticamente constantes durante todo o período analisado. Porém, não foi possível obter resultados conclusivos, dado que a base de dados de métricas ambientais (emissões atmosféricas) utilizada foi restrita. Entretanto, a análise é promissora, dado que a ampliação da base de dados poderá proporcionar à empresa uma análise mais aprofundada da relação entre as métricas de desempenho na geração de uma usina termoeletrica.

**Palavras-Chave:** Correlação; Usina termoeletrica; Emissões atmosféricas; Métricas de desempenho operacional e ambiental.

**ABSTRACT**

With the changes in the Brazilian energy matrix that have been occurring in the past few years due to the water crisis, researches in the thermoelectrical field become more and more relevant. In the research described here, from a documentary analysis of the operational registers and environmental reports of a thermoelectric power plant, were developed probabilistic researches of performance metrics of the plant in question. These analysis were divided in: correlation analysis and specific fuel oil consumption and efficiency analysis, where were studied different metrics, with different approaches. The first analysis provides indications that correlation coefficients between the studied performance metrics do not follow a rule, as they vary according to the analyzed engine. The result of the following analysis was that quantities like specific consumption and efficiency have remained nearly constant during the whole analysis period. However, it was not possible to obtain conclusive results, since the environmental performance metrics (atmospheric emissions) database was too restrict. However, the analysis is promising, since that a database ampliation may provide the company a deeper analysis between the performance metrics in the power generation of a thermoelectric plant.

**Keywords:** Atmospheric emissions; Correlation; Operational and environmental performance metrics; Thermoelectric power plant.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de pesquisas em usinas termoeletricas é de grande relevância, devido a participação destas na matriz energética brasileira. A pesquisa aqui descrita tem como objeto de estudo uma usina termoeletrica, com as análises desenvolvidas focadas em indicadores ambientais e operacionais desta usina.

As usinas termoeletricas podem ser construídas próximas aos centros de consumo, o que gera uma grande economia na construção das linhas de transmissão, já que elas podem ser mais curtas, o que é uma vantagem em relação às demais formas de geração.

Porém, as usinas termoeletricas também apresentam certas desvantagens em relação às hidroeletricas, pois acabam tendo maior gasto na produção de energia devido ao aumento constante no preço dos combustíveis usados nas termoeletricas. Além disto, o transporte desses combustíveis é um fator de complicação no processo de geração, já que este muitas vezes ocorre por meio de carretas, que geram trânsito e altos custos (Coelho, 2015).

Além do custo na produção, há o possível dano ao meio ambiente, tanto na extração da matéria-prima, que é usada como combustível, como na geração de energia com a liberação de emissões atmosféricas (Colossi, 2012).

Sabe-se que algumas características operacionais das usinas termoeletricas influenciam a magnitude das emissões atmosféricas, como por exemplo, o tipo de combustível utilizado e as características dos geradores (Coelho, 2015; IEMA, 2016).

Diante do exposto, o estudo sobre a relação entre características operacionais de uma termoeletrica e emissões atmosféricas se mostra relevante em busca da melhoria da eficiência na produção da energia, tanto no contexto operacional quanto ambiental.

Além disso, outro parâmetro relevante para ser analisado em usinas termoeletricas é o rendimento do grupo gerador, que reflete a eficiência do processo de geração, fator de grande interesse por parte dessas usinas, principalmente pelos impactos financeiros que este fator pode causar.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

O objeto de estudo foi uma usina termoeletrica brasileira, cujo nome não será citado por motivos de confidencialidade. A usina possui uma capacidade instalada de 169 MW e atende a 36 distribuidoras, em vários estados.

A geração de energia na usina em é realizada a partir de 20 motores 20V32 da WÄRTSILÄ, que possuem as seguintes características: frequência de 60 Hz, potência nominal de 8,73 MW, eficiência elétrica de 46,2% e utiliza como combustível o OCB1. Este motores funcionam a combustão interna e é caracterizado como um motor ciclo-diesel de quatro tempos.

Na usina em questão, de 2011 a 2016, este monitoramento foi realizado por amostragem, ou seja, foram realizadas medições pontuais nas chaminés, uma vez a cada ano, por um laboratório especializado. A partir das medições realizadas, foram gerados relatórios que proporcionaram analisar as seguintes emissões: material particulado (MP), óxidos de enxofre (SOx), óxidos de nitrogênio (NOx) e hidrocarbonetos totais (THC).

O primeiro passo para realizar as análises desejadas foi definir quais seriam as métricas de desempenho de interesse. Inicialmente, foram escolhidos parâmetros presentes nos RDO (Registro Diário de Operação) da usina. Estes documentos contêm todas as informações relevantes sobre o funcionamento da termoeletrica por dia, tendo os motores operado ou não.

A partir dos RDO foram escolhidos índices desses documentos para compor parte das análises de correlação que serão descritas a seguir. Estes índices foram: geração diária de energia, potência média diária, horímetro do motor e consumo diário de combustível, os quais foram denominados de métricas de desempenho operacionais.

Segundo Kondo (2007), os níveis das emissões atmosféricas em usinas termoeletricas são considerados índices de desempenho ambientais, assim, estes níveis também foram inseridos nas análises de correlação.

Por fim, outros dois índices foram analisados, a saber: o consumo específico de combustível (SFOC – Specific Fuel Oil Consumption), dado em kg/MWh, parâmetro que reflete a quantidade de

combustível necessária para gerar 1 MWh; e a eficiência ou rendimento dos motores, parâmetro essencial para usinas termoeletricas.

A análise inicial constituiu no estudo dos relatórios de emissões atmosféricas elaborados pelo laboratório, juntamente com os RDOs e planilhas de análise de controle dos dias em que as medições foram realizadas. Foram comparadas, portanto, as métricas de desempenho operacionais citadas com as emissões atmosféricas medidas pelo laboratório nos dias específicos dos relatórios. Com isto, foi possível construir tabelas com métricas operacionais e ambientais ao longo dos anos. O objetivo desta análise foi buscar determinar níveis de correlação entre as emissões atmosféricas e os índices operacionais. Para tanto, foi necessário separar estes parâmetros por motores.

A correlação é um parâmetro estatístico que resulta no grau de dependência entre duas variáveis. Esta análise é pertinente ao tema estudado, já que por meio desta, pode-se entender melhor o comportamento das grandezas, bem como observar se a variação de uma métrica operacional pode interferir diretamente nas emissões atmosféricas. O coeficiente de correlação varia, em valores absolutos, de 0 a 1, classificando a correlação entre as grandezas de muito fraca (0,0) a muito forte (1,0). Um valor negativo de correlação indica que as grandezas possuem dependência inversa.

Outra análise realizada foi a da relação entre o consumo específico (SFOC – Specific Fuel Oil Consumption) e rendimento. O primeiro passo para este estudo foi o mapeamento de grandezas necessárias para o cálculo do consumo específico, conforme a expressão 1.

$$SFOC = \frac{\text{Consumo de Combustível}(kg)}{\text{Geração}(MWh)}. \quad (1)$$

Estes parâmetros foram extraídos dos RDOs, no período de janeiro de 2013 a dezembro de 2017, totalizando 5 anos de operação. Vale ressaltar, que os dados não são os valores acumulados dos meses, mas sim, valores diários do primeiro dia de operação de cada mês. Com estes dados, foi possível construir um gráfico da variação do SFOC ao longo dos anos, bem como sua média, desvio padrão e outros parâmetros.

Em seguida, foi realizada uma análise do rendimento dos motores da usina ( $\eta_e$ ). Segundo Gomes (2014), o rendimento de um grupo gerador pode ser calculado por:

$$\eta_e = \frac{360000}{SFOC \times PCI}. \quad (2)$$

O SFOC é dado em kg/kWh e o PCI é o poder calorífico inferior do combustível, dado em kJ/kg, que é um valor tabelado referente ao tipo de combustível utilizado. O PCI do combustível OCB1 é de 41,221 kJ/kg. Portanto, a partir da Equação 6, do valor do PCI do combustível e dos valores do SFOC, foi possível calcular o rendimento do grupo gerador ao longo dos anos de operação analisados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira análise, a de correlação, foi realizada a partir dos dados disponíveis, determinou-se os índices de correlação entre cada tipo emissão e as métricas operacionais. Para ilustrar a análise realizada, na Tabela 1 são apresentados os valores dos níveis de correlação entre os parâmetros analisados para o motor A, um dos 8 motores estudados. A partir desta tabela, pode-se destacar alguns coeficientes de correlação considerados fortes no motor A, como a correlação entre o CO<sub>2</sub> e o horímetro e entre o NO<sub>x</sub> e o fluxômetro.

Tabela 1. Níveis de Correlação entre as Métricas Operacionais e Ambientais para o Motor A.

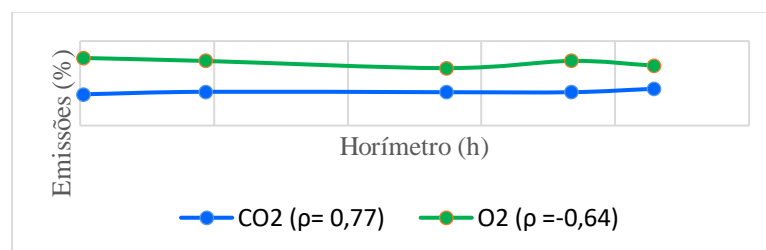
<b>MP – Geração</b>	0,5814	<b>SO<sub>x</sub> - Geração</b>	0,5485	<b>NO<sub>x</sub> – Geração</b>	0,7072
<b>MP – Potência</b>	-	<b>SO<sub>x</sub> - Potência</b>	0,4039	<b>NO<sub>x</sub> – Potência</b>	-
	0,2636				0,0152
<b>MP - Horímetro</b>	0,1320	<b>SO<sub>x</sub></b>	-	<b>NO<sub>x</sub></b>	-
		<b>Horímetro</b>	0,1029	<b>Horímetro</b>	0,3750
<b>MP</b>	-	<b>SO<sub>x</sub></b>	-	<b>NO<sub>x</sub></b>	-
<b>Fluxômetro</b>	0,6055	<b>Fluxômetro</b>	0,5730	<b>Fluxômetro</b>	0,7315
<b>CO – Geração</b>	-	<b>CO<sub>2</sub> - Geração</b>	0,2814	<b>O<sub>2</sub> – Geração</b>	-
	0,1697				0,6406
<b>CO – Potência</b>	0,4971	<b>CO<sub>2</sub> - Potência</b>	-	<b>O<sub>2</sub> – Potência</b>	0,1276
			0,2492		
<b>CO – Horímetro</b>	0,3373	<b>CO<sub>2</sub></b>	-	<b>O<sub>2</sub></b>	-
		<b>Horímetro</b>	0,7663	<b>Horímetro</b>	0,6405
<b>CO</b>	-	<b>CO<sub>2</sub></b>	-	<b>O<sub>2</sub></b>	-
<b>Fluxômetro</b>	0,1820	<b>Fluxômetro</b>	0,2751	<b>Fluxômetro</b>	0,6595

Além disto, foram gerados gráficos de emissões versus os índices operacionais para melhor visualização da variação dessas grandezas. Vale ressaltar que os coeficientes de correlação ( $\rho$ ) entre

a emissão e a métrica operacional correspondente estão indicados na legenda dos gráficos. Os níveis das emissões atmosféricas não foram expostos devido a questões de confidencialidade.

Na Figura 1 é apresentado um gráfico das emissões de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> versus o horímetro no motor A. Pode-se observar que o comportamento mais linear da curva do CO<sub>2</sub> está relacionado ao coeficiente de correlação mais elevado deste parâmetro. O trecho entre o terceiro e o quarto ponto da curva de O<sub>2</sub>, que é crescente, provoca o decaimento do coeficiente de correlação entre este parâmetro e o horímetro.

Figura 1. Emissões de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> versus horímetro para o motor A.



Esta análise de correlação foi feita para 8 motores (2 por torre), para comparar os valores obtidos e observar se estes se mantêm próximos (entre os motores) ou se divergem, ou seja, se há diferença significativa em função do motor analisado. O critério de escolha dos motores foi de acordo com a quantidade de dados obtidos de cada motor, escolhendo aqueles que possuem mais dados nos relatórios de emissões atmosféricas.

A partir da realização desta análise para os diferentes motores, pôde-se concluir que a correlação entre as grandezas não segue, necessariamente, um comportamento padrão, já que os coeficientes apresentaram comportamentos diferentes de acordo com o motor analisado. Portanto, de acordo com os resultados obtidos, não existe uma regra que defina a correlação entre as métricas operacionais e ambientais escolhidas, para a base de dados analisada.

Por fim, como resultado das análises de rendimento e consumo específico, foram construídos os gráficos mostrados nas Figuras 2 e 3, que mostram que estas grandezas se mantiveram praticamente constantes ao longo dos anos analisados. Este fato pode ser reforçado pela análise estatística realizada (cálculo de média, desvio padrão, coeficiente de variação, entre outros), mostrada na Tabela 2.

Os baixos valores de desvio padrão e coeficiente de variação das duas grandezas, mostrando que os valores estão concentrados em torno de seu valor médio, ou seja, os dois parâmetros analisados se mantiveram praticamente constantes ao longo do período de análise.

Figura 2. Variação do Consumo Específico de Combustível ao longo de 5 anos de operação da usina.

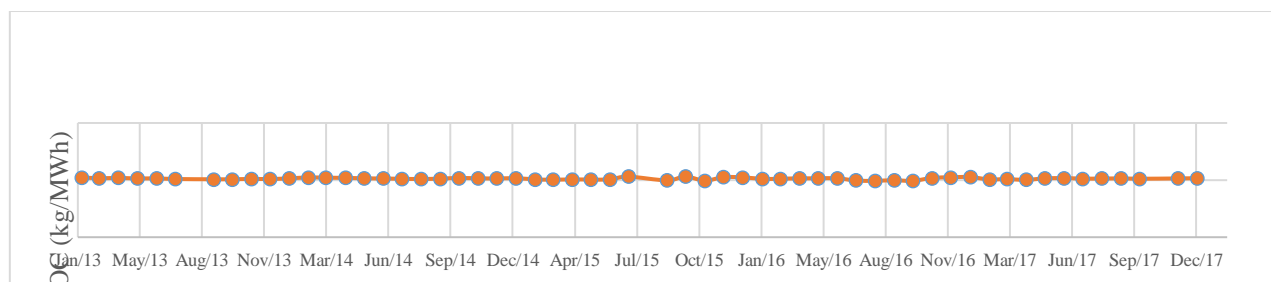


Figura 3. Variação do Rendimento do Grupo Gerador ao longo de 5 anos de operação da usina.

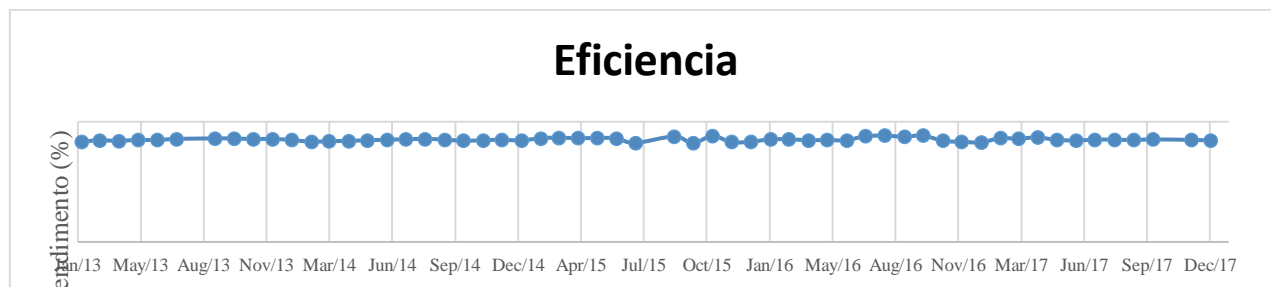


Tabela 2. Análise Estatística - SFOC e Rendimento.

	SFOC	Rendimento
<b>Média</b>	205,12 kg/MWh	42,59 %
<b>Valor máximo</b>	212,48 kg/MWh	44,25 %
<b>Valor mínimo</b>	197,36 kg/MWh	41,10 %
<b>Desvio padrão</b>	3,43 kg/MWh	0,72 %
<b>Coefficiente de Variação</b>	1,67 %	1,69 %
<b>Correlação</b>	-0,9997	

#### 4 CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas, não foi possível concluir que os coeficientes de correlação seguem um comportamento similar, para todas as métricas e para todos os motores, variando consideravelmente de acordo com o motor analisado. O motivo deste comportamento é justificado fortemente pela escassez de dados, principalmente de emissões atmosféricas, dado que essas foram coletadas uma vez por ano.

Uma possível melhoria, proposta para pesquisas futuros consiste na ampliação da base de dados de emissões atmosféricas. Neste caso, será possível observar com maior precisão o comportamento das grandezas e de suas correlações.

No que diz respeito à análise de consumo específico de combustível e rendimento, vale destacar como estas grandezas se mantiveram praticamente constantes ao longo de todo o período analisado. Porém, ainda assim, a ocorrência de uma pequena variação poderá ser analisada de forma

mais aprofundada em pesquisas futuras, como por exemplo, verificar o impacto financeiro e ambiental que essas variações podem causar.

### **AGRADECIMENTOS**

À usina termoeétrica pela oportunidade de desenvolver essa pesquisa e a todos os funcionários da empresa que auxiliaram os autores no desenvolvimento.

### **REFERÊNCIAS**

Coelho, P. Usinas Termoeétricas – A Energia da Combustão, jun. 2015. Disponível em <<http://www.engquimicasantosp.com.br/2015/06/usinas-termoeletricas-energia-combustao.html>>. Acesso em: 02 out. 2017.

Colossi, B. R. Avaliação Ambiental de um Usina Termoeétrica à Óleo Combustível Utilizando Análise do Ciclo de Vida. 2012. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2012.

Gomes, A. E. V. Recuperação da Energia Térmica de Motores de Combustão Interna numa Central Termoeétrica. Dissertação de Mestrado (Equipamentos e Sistemas Mecânicos) - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, nov. 2014.

IEMA. Geração Termoeétrica e emissões atmosféricas: poluentes e sistemas de controle. Instituto de Energia e Meio Ambiente. São Paulo, nov. 2016. Disponível em: <<http://www.energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2016/11/IEMA-EMISSOES.pdf>>. Acesso em: 02 out. 2017.

KONDO, N. N. Determinação de Índices de Desempenho em Usinas Termoeétricas. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2007.